

УДК 620.179.16: 620.179.17

САЛАМ БУССИ, Г. М. СУЧКОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОКАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Выполнен анализ информационных источников по теоретическому и модельному исследованиям, разработкам способов и приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий, а также применению таких устройств для дефектоскопии, толщинометрии, диагностики и определения физико – механических характеристик материалов металлоизделий.

Установлено, что на сегодня не разработаны общие теоретические основы построения электромагнитно-акустических преобразователей различного назначения. Поэтому работы в этом направлении актуальны.

Показана перспективность использования импульсного намагничивания изделий, что позволяет увеличивать индукцию магнитного поля до 2...3 Тл. Однако необходимо решать вопрос подавления шумов Баркгаузена. Кроме того, при контроле ферромагнитных изделий типа труб, заготовок, рельсов, листов и др. необходимо решать вопрос сильного притяжения преобразователя к металлу, а при использовании постоянных магнитов – налипания отслоившейся окалины.

Экспериментально показана высокая эффективность применения устройств и установок для дефектоскопии, особенно при автоматическом контроле больших объемов катаных изделий.

Ключевые слова: металлоизделие, бесконтактный ультразвуковой контроль, дефект, чувствительность, электромагнитно-акустический, дефектоскопия, толщинометрия, диагностика.

САЛАМ БУССИ, Г. М. СУЧКОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПРОКАТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Виконано аналіз інформаційних джерел з теоретичного і модельного досліджень, розробок способів і приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів, а також застосування таких пристроїв для дефектоскопії, товщинометрії, діагностики та визначення фізико - механічних характеристик матеріалів металовиробів.

Встановлено, що на сьогодні не розроблені загальні теоретичні основи побудови електромагнітно-акустичних перетворювачів різного призначення. Тому роботи в цьому напрямку є актуальними.

Показана перспективність використання імпульсного намагнічування виробів, що дозволяє збільшувати індукцію магнітного поля до 2...3 Тл. Однак необхідно вирішувати питання придушення шумів Баркгаузена. Крім того, при контролі феромагнітних виробів типу труб, заготовок, рейок, листів та ін. Необхідно вирішувати питання сильного тяжіння перетворювача до металу, а при використанні постійних магнітів - налипання відшарувалася окалини.

Експериментально показана висока ефективність застосування пристроїв і установок для дефектоскопії, особливо при автоматичному контролі великих обсягів катаних виробів.

Ключові слова: металовиріб, безконтактний ультразвуковий контроль, дефект, чутливість, електромагнітно-акустичний, дефектоскопія, товщинометрія, діагностика.

SALAM BUSSI, G. M. SUCHKOV, R. P. MIGUSCHENKO, O. Yu. KROPACHEK, S. Yu. PLESNETSOV**CURRENT STATE OF METHODS AND MEANS OF ULTRASONIC CONTROL RENTAL WITH USE OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC CONVERTERS**

The analysis of information sources on theoretical and model research, the development of methods and devices for electromagnetic - acoustic control of metal products, as well as the use of such devices for flaw detection, thickness measurement, diagnostics and determination of physico - mechanical characteristics of metal products is carried out.

It is established that today the general theoretical foundations of constructing electromagnetic - acoustic transducers for various purposes have not been developed. Therefore, work in this direction is relevant.

The prospects of using pulsed magnetization of products is shown, which allows to increase the magnetic field induction to 2 ... 3 T. However, it is necessary to resolve the issue of Barkhausen noise reduction. In addition, when monitoring ferromagnetic products such as pipes, billets, rails, sheets, etc., it is necessary to solve the issue of strong attraction of the converter to the metal, and when using permanent magnets, the adhesion of exfoliated scale.

The high efficiency of the use of devices and installations for flaw detection has been experimentally shown, especially with automatic control of large volumes of rolled products.

Key words: metal products, non-contact ultrasonic testing, defect, sensitivity, electromagnetic-acoustic, flaw detection, thickness measurement, diagnostics.

Введение. В мире огромное количество изделий изготавливают путем прокатки: листы, трубы, заготовки, рельсы и др. Требования к качеству этой продукции возрастают и обеспечиваются неразрушающими методами контроля (НК), среди которых основным является ультразвуковой (УЗ). Большие объемы выпуска металлоизделий требуют выполнять УЗ контроль с высокой скоростью сканирования, в горячем и холодном состоянии, зачищать поверхность объектов контроля (ОК). В таких условиях традиционные контактные методы во

многих случаях не могут обеспечить качественный УЗ контроль (УЗК). Аналогичные проблемы имеют место при эксплуатации различных объектов и изделий, например, с лакокрасочными или пластиковыми покрытиями, которые необходимо удалять перед проведением УЗ дефектоскопии, а затем восстанавливать после контроля, что значительно удорожает технологию НК.

Решить отмеченные недостатки традиционного метода УЗ контроля возможно за счет применения бесконтактных методов возбуждения и приема

ультразвуковых импульсов, среди которых наиболее развитым считается электромагнитно – акустический (ЭМА) [1]. При этом авторы работы [2] при оценке состояния и тенденций развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики утверждают о значительном интересе мировых разработчиков к использованию ЭМА контроля. Существенная экономическая эффективность применения ЭМА контроля подтверждается в статьях [3–4], и данными о его промышленном применении, например, на сайте [5]. Это говорит об актуальности исследований и разработок по ЭМА контролю.

Теоретические и экспериментальные исследования, разработки методов и средств эма контроля и диагностики. Большинство специалистов традиционно считают, что главным недостатком ЭМА преобразователей, который сдерживает их использование в промышленности, является низкая чувствительность к несоответствиям ОК, выявление которых регламентируется нормативно-технической документацией. Согласно публикациям [6–9] существует значительное разночтение в оценке этого параметра при обнаружении внутренних дефектов эхо методом. Причем, в справочнике [1] указано, что чувствительность ультразвукового ЭМА метода при двойном преобразовании меньше, чем контактного на 4 порядка, а в работе [6], что на 3 порядка. Кроме того, в работе [1] утверждается, что коэффициент преобразования ЭМАП для излучения и приема по отдельности меньше, чем для пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) на 2 порядка. Алешин Н.П. и др. в работе [7] показали, что коэффициент двойного ЭМА преобразования отличается от такого же для ПЭП в 500...1000 раз, а коэффициенты для излучения и приема по отдельности отличаются между собой в 2 раза. При этом в [1, с. 74] отмечается, что ЭМА методом уверенно обнаруживаются модели дефектов незначительного размера. Следует отметить, что Кавашима К. еще в 1976 г. [8] приводил данные о том, что выявляемость плоскодонного отражателя диаметром 1,3 мм ЭМАП и ПЭП практически одинаковы. АО «Votum» [9] серийно выпускает приборы ультразвукового контроля с ЭМА преобразователями (УД4-Т), но при этом отмечает их недостаточную чувствительность? При контроле поверхностными волнами в работе [10] доказана возможность выявления поверхностных дефектов глубиной 0,2...0,5 мм на расстояниях более 1 м, а в работе [11] даже глубиной 0,01 мм.

Приведенные противоречивые результаты о чувствительности (обнаруживаемости) ЭМА контроля говорят о высокой сложности теоретических работ и исследований, от которых зависят результаты разработки и использования ЭМА преобразователей. Так, Ермолов И.Н. в работе [12] рассмотрел «...достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии примерно за 20 прошедших лет». Им показано, что в последнее время наметились тенденции использования новых или мало

применяемых типов ультразвуковых волн, которые раньше почти не использовались для диагностики объектов различного вида. В связи с этим возникают проблемы теоретического и практического характера. Значительное количество существенных проблем контроля может быть решено с применением ЭМА преобразователей. При этом Ермолов И.Н. указывает на недостаточность разработок специального оборудования для реализации ЭМА метода в промышленности: ЭМАП, генераторов мощных высокочастотных импульсов, малошумящих усилителей, быстродействующих систем обработки информации.

Сазонов Ю.И. [13] также указывает на то, что исследование макро– и микроскопических механизмов ЭМА преобразования различного вида является одной из наиболее важных и, в то же время, сложных проблем радиофизики, физической и прикладной акустики, физики твердого тела, физики магнитных явлений, теплофизики и молекулярной физики. Исследование ЭМА эффектов является нетипичной задачей электродинамики взаимодействующих тел и полей разного типа и структуры. Изучение ЭМА эффекта дает возможность лучше понять физические процессы генерации, распространения и приема ультразвуковых волн электромагнитными методами, что важно для построения общей теории и создания разного рода устройств и преобразователей, т.е. ставится задача построения общей теории ЭМА преобразования; создания научных основ конструирования ЭМАП и необходимого специального оборудования.

Многие исследователи из разных стран за последние 15 лет выполняли теоретические, модельные и практические исследования, направленные на разработку оборудования для ультразвукового контроля с применением ЭМАП [14–48].

Так, группой исследователей под руководством Мужижкого В.Ф. опубликовано более 50 теоретических статей, например, [14–18], направленных на исследование механизмов прямого, обратного и двойного ЭМА преобразования в приложении к толщинометрии и дефектоскопии в нормальном и тангенциальном поляризуемых полях в основном для накладных ЭМАП.

Группа ученых из Ижевска под руководством Муравьевой О.В., Муравьева В.В. опубликовала более 30 теоретических и модельных статей, по тематике, связанной с ЭМА контролем стержней, труб и аналогичных изделий, например, [19–23]. Выполнены ограниченные исследования локальных процессов преобразования, диаграмм направленности синфазных и противофазных ЭМА преобразователей при разных размерах и расположении элементов высокочастотных катушек и намагничивающей системы.

Авторы работ [24–29] на базе теории Власова К.Б., теоремы Шокли-Рамо и теоремы Дж. Маллинсона пошли по пути комплексного создания математических моделей, во время которых удалось вычленил в общем расчетном выражении часть,

которая позволяет производить расчеты конструкций ЭМАП для возбуждения и приема поверхностных и крутильных колебаний. При исследованиях применен метод интегральных преобразований, который, с учетом современных вычислительных возможностях, целесообразно использовать при дальнейших исследованиях.

Значительная часть исследователей направили усилия на создание средств ЭМА контроля за счет широкого применения моделирования и теоретических исследований [25–31]. Так, Чабанов В.Е. и Жуков В.А. рассмотрели проблемы, связанные с конструированием ЭМАП [31] и утверждают, что для эффективной разработки ЭМАП необходимо учитывать не менее 35 параметров. Ими получена чрезвычайно громоздкая математическая модель, учитывающая 38 параметров, но методологии, каким образом с ее помощью рассчитать конструкцию ЭМАП с заданными характеристиками не приведено.

В известных источниках, опубликованных за рубежом [32–48] просматривается аналогичная вышеописанной структура работ и результатов по вопросу ЭМА контроля: теоретические исследования; разработки и моделирование; практическое применение. Следует отметить, что в теоретическом плане зарубежные исследования принципиально не отличаются от вышеупомянутых полученных результатов, например, [13, 32]. Они в большей степени посвящены моделированию [33–36] направленному совершенствованию ЭМАП и разработке ЭМА преобразователей для конкретных практических применений [37–41]. Применение преобразователей в промышленности для контроля неординарных изделий и материалов [42–44] в том числе с использованием нелинейных эффектов [45]. Продолжаются исследования, направленные на совершенствование конструкций приборов [46–47], а также применение методов обработки информации [48].

Из экспериментальных результатов можно отметить перспективные разработки ЭМАП с импульсным намагничиваем [49–51]. Величину индукции магнитного поля удастся увеличивать до 2...3 Тл, однако не решен вопрос исключения шумов Баркгаузена, помех в металлических элементах конструкции преобразователя, шумов образующихся за счет магнитострикционного преобразования электромагнитной энергии в ультразвуковую. В результате обнаруживаемость дефектов практически не повышается.

Существует ряд несоответствий выводов теории и экспериментальных результатов. До настоящего времени не установлены причины нелинейной зависимости амплитуды эхосигналов, отраженных от дискового отражателя от высокочастотного тока в индукторе ЭМАП [52] при прочих равных условиях.

Требуются теоретические исследования физического эффекта появления дополнительных когерентных сигналов между зондирующим и первым донным, а также между любыми двумя донными импульсами при контроле листов, который был обнаружен в 2001 г. [53] и подтвержден в 2016–2017 г. [54–55].

Анализ информационных источников показывает, что основными параметрами, определяющими обнаруживаемость дефектов, являются ток в индукторе и величина индукции магнитного поля ЭМАП. Однако их увеличение оправдано до определенного предела, после которого на результаты УЗК начинают влиять помехи различного типа, в том числе и когерентные с которыми бороться сложно. Известные методы обработки применимы при ЭМА контроле, например, [48], существенно усложняют и удорожают аппаратуру. Поэтому необходим поиск новых технических и технологических решений, которые дадут возможность повысить выявляемость дефектов ОК, в том числе и при скоростном УЗК прокатных изделий, существенно упростить технологию УЗ контроля металлоизделий с применением ЭМАП.

Выводы

1. Анализ литературных источников позволил установить продолжающийся мировой интерес к использованию электромагнитно – акустических преобразователей для ультразвукового бесконтактного контроля качества металлопроката.

2. Продолжаются теоретические исследования по разработке общей теории конструирования электромагнитно – акустических преобразователей. Намечались шаги с использованием метода интегральных преобразований обосновать перспективу расчетов конструкций ЭМАП с заданными характеристиками.

3. Разработаны новые электромагнитно – акустических преобразователи, которые позволяют контролировать медные трубы, алюминиевые листы, рельсы, сварные швы и др. ОК.

4. Показана перспективность использования импульсного намагничивания изделий, что позволяет увеличивать индукцию магнитного поля до 2...3 Тл. Однако необходимо решать вопрос подавления шумов Баркгаузена. Кроме того, при контроле ферромагнитных изделий типа труб, заготовок, рельсов, листов и др. необходимо решать вопрос сильного притяжения преобразователя к металлу, а при использовании постоянных магнитов – налипания отслоившейся окалины.

5. Экспериментально показана высокая экономическая эффективность применения устройств и установок для дефектоскопии, особенно при автоматическом контроле больших объемов катаных изделий.

Список литературы

- Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль // М.: Изд-во Машиностроение, 2004. 864 с.
- Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Шевальдыкин В.Г. Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики // Территория NDT. 2014. №2. С. 24–27.
- Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 3. С. 8–10.
- Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок // Территория NDT. 2014. №1. С.42–43.
- Сайт компании Nordinkraft [электронный ресурс] // Режим доступа: www.nordinkraft.de. – (Дата обращения: 23.08.2019)
- Цапенко В.К., Куц Ю.В. Основы ультразвукового неразрушающего контроля: Підручник. // Київ: Изд-во НТУУ «КПИ», 2010. 448 с.
- Алешин Н.П., Белый В.Е., Вовилкин А.Х., Воинов А.К., Ермолов И.Н., Гураич А.К. Методы акустического контроля металлов. Под ред. Алешина Н.П. // М.: Изд-во Машиностроение, 1989. 456 с.
- Kawashima K., McClung R. Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radially polarized transverse // Materials Evaluation, 1976. Vol. 34. No 4. P. 81–90.
- Сайт All-Pribors. Статистика АО "Votum", Молдова, г.Кишинев [электронный ресурс] // Режим доступа: <https://all-pribors.ru/companies/ao-votum-moldova-g-kishinev-1625>. – (Дата обращения: 23.08.2019)
- Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хащина С.В., Десятиченко А.В., Ноздрачева Е.Л. Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных изделий // Контроль. Диагностика, 2013. №4. С. 31–35.
- Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Кокорина Е.Н., Лойферман М.А. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин // В мире неразрушающего контроля, 2013. №1. С. 62–70.
- Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия, 2004. № 10. С. 13–48.
- Сазонов Ю.И. Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования // XXVII сессия Российского акустического общества, посв. памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смолякова и В.И. Попкова. С.-Петербург. 16–18 апреля 2014. 17 с.
- Мужицкий В.Ф., Комаров В.А. Двойное ЭМАП при электродинамическом механизме преобразования в нормальном поляризующем поле // Дефектоскопия. 2009. №2. С.67–77.
- Комаров В.А., Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б. К основам ЭМА толщинотри с помощью накладных преобразователей. III. Обратное и двойное ЭМАП в нормальном поляризующем поле // Дефектоскопия. 2007. № 1. С. 64–79.
- Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. Прямое электродинамическое ЭМАП в нормальном поляризующем поле. III. Зависимость акустического поля от макроскопических параметров среды преобразования // Дефектоскопия. 2008. №8. С. 21–34.
- Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. К основам ЭМА толщинотри с помощью накладных преобразователей. IV. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризующем поле // Дефектоскопия. 2007. №2. С.35–52.
- Ремезов В.Б. Исследование электромагнитных полей, возбуждаемых излучателем типа «виток» // Дефектоскопия. 2013. №7. С.3–12.
- Муравьева О.В., Муравьев В.В., Мышкин А.В. Влияние конструктивных особенностей противофазных электромагнитно-акустических преобразователей на формирование диаграмм направленности. // Дефектоскопия. 2014. № 9. С. 41–49.
- Муравьева О.В., Мышкин А.В. Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей // Дефектоскопия. 2013. № 12. С. 69–76.
- Мышкин А.В. Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей. Дис. к.т.н. Ижевск, 2015. 175 с.
- Муравьева О.В., Кокорина Е.Н., Стерхов В.Д., Малютин Д.В. Моделирование систем подмагничивания электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для контроля пруткового проката // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства: Сб. материалов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ижевск. Изд-во ИжГТУ, 2012. С. 198–202.
- Фокеева Е. Н. Электромагнитно-акустический зеркально-теневой метод контроля качества прутков из рессорно-пружинной стали. Дис. к.т.н.. Ижевск, 2013. 147 с.
- Петрищев О.Н., Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 1. Теоретические основы расчета и проектирования электроакустических преобразователей электромагнитного типа: монография. – Харків: Видавництво «Оберіг», 2019 – 556 с.
- Плеснецов С.Ю., Петрищев О.Н., Мизуценко Р.П., Сучков Г.М. Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн // Технічна електродинаміка. 2017. № 3. С. 79–88.
- Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2 // Tekhnichna Elektrodynamika. 2018. № 1. P. 30–36.
- Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3 // Tekhnichna Elektrodynamika, 2018. No 3. P. 10–19.
- Plesnetsov S.Yu., Migushchenko R.P., Petryshev O.N., Suchkov G.M., Khrypunov G.S. Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals // Journal of nano- and electronic physics. 2017. Vol. 9. No 5. 05041 (7pp).
- Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M., Khrypunova A.L. Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2018. 5(4), 04001, (9pp).
- Мизуценко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Болюх В.Ф., Плеснецов С.Ю., Кочерга А.И. Информационно-измерительные электроакустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми волнами Релея // Технічна електродинаміка, 2017. № 2. С. 70–76.
- Чабанов В. Е., Жуков В. А. Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля, 2013. №1. С. 36–43.
- Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Oingxin Yang. Microscopic Mechanism and Experiment Research of Electromagnetically Induced Acoustic Emission // IEEE Transactions on Magnetics. November 2015. Vol. 51. No. 11, Code 9401804. 4pgs.
- Shen Wang, Songling Huang, Yu Zhang, Wei Zhao. Multiphysics Modeling of a Lorentz Force-Based Meander Coil Electromagnetic Acoustic Transducer via Steady-State and Transient Analyses // IEEE Sensors Journal, 2016, Vol. 16, No 17. P. 6641 – 6651. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2587620.
- Yong Li, Yi-li Li, Zhen-mao Chen. A fast analytical model of Electromagnetic Acoustic Transducers for evaluation of flat non-magnetic conductors // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 237 – 241. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928271.
- Yuedong Xie, G Sergio Rodriguez, Wuliang Yin, Anthony Peyton, Zenghua Liu, Jianna Hao, Qian Zhao, Ben Wang. Simulation and experimental verification of a meander-line-coil electromagnetic acoustic transducers (EMATs). 2016. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Pages: 1 – 6, DOI:10.1109/I2MTC.2016.7520422.
- Fumio Kojima, Akinori Furusawa, Takafumi Ito. Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic

- transducer // 10th Asian Control Conference (ASCC). IEEE Conference Publications, 2015. P. 1-6. DOI:10.1109/ASCC.2015.7244773.
37. Guo-fu Zhai, Bo Liu, Chao-ran Deng, Yong-qian Li, Lei Kang. An inspection device based on multiple Lamb wave electromagnetic acoustic transducers // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 14 – 18. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928225.
 38. Wilcox P.D., M. Lowe JS, Cawley P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, Vol. 52, No. 12. P. 2370 – 2383. DOI: 10.1109/TUFFC.2005.1563281.
 39. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Bihan Y. Le. Electromagnetic Acoustic Transducer for cracks detection in conductive material. // 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE Conference Publications. P. 1 – 4. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416717.
 40. Huidong G., Borja L. Разработка одноканальных электромагнитных акустических преобразователей и электромагнитных акустических фазированных решеток для контроля аустенитных швов [электронный ресурс] // Эколинк оборудование. Режим доступа: http://ekolink.ru/data/1/Austenitic_Weld_Article.pdf. – (Дата обращения: 23.08.2019).
 41. Eiji Matsumoto, Shinji Kitamura, Jun Abe. Optimal design of electromagnetic acoustic transducer // The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607846.
 42. Kousuke Kanda, Koudai Okazaki, Toshihiko Sugiura. Wire-rope Inspection Using Guided Waves Transmitted by Electromagnetic Acoustic Transducers // 日本AEM 学会誌, 2015. Vol. 23. No.1.
 43. Yamasaki T., Kawabe D., Ohtani T., Hirao M. Flaw Detection in Copper Tubes Using Longitudinal Wave by Electromagnetic Acoustic Transducers // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers, 2004. No. 70 (690). P. 238– 245.
 44. Costin Vasile, Cornel Ioana. Arc fault detection & localization by electromagnetic-acoustic remote sensing // 2016 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). P. 1–2. DOI:10.1109/RADIO.2016.7772044.
 45. Fei Gao, Xiaohua Feng, Siyu Liu, Ruochong Zhang, Ran Ding, Rahul Kishor, Yuanjin Zheng. Nonlinear electromagnetic-acoustic sensing and imaging. // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE Conference Publications. P. 2017 – 2020. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848379.
 46. Liang Jin, Suzhen Liu, Qingxin Yang, Haiyan Chen, Chuang Zhang. Study of electromagnetic acoustic emission for non-destructive testing. 2008 World Automation Congress. P. 1 – 4.
 47. Alers G. A. Electromagnetic induction of ultrasonic waves: EMAT, EMUS, EMAR [электронный ресурс] // 16th World Conference on NDT. 2004. Montreal, Canada. Режим доступа: http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/691_alers.pdf. – (Дата обращения: 23.08.2019).
 48. McNamara J., Lanza di Scalea F. Improvements in Noncontact Ultrasonic Testing of Rails by the Discrete Wavelet Transform // Materials Evaluation, 2004. No. 62 (3). P. 365-372.
 49. Салам Буссі ЕП. Мішел Кассаблі. Ультразвуковий перетворювач для безконтактного контролю виробів з феромагнітних матеріалів // Матеріали І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: літні диспути». 2019. 1-2 серпня. С. 620–624.
 50. Алехин С.Г. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: канд. дис. // М.: МНПО «Спектр», 2013. 95 с.
 51. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий: докт. дис. // Харьков, НТУ «ХПИ», 2005. 521 с.
 52. Сучков Г.М., Донченко А.В., Десятниченко А.В., Келин А.А., Ноздрачева Е.Л. Повышение чувствительности ЭМА приборов // Дефектоскопия. 2008. №2. С. 15–22.
 53. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. 2001. № 12. С. 36–39.
 54. Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г. Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине: анализ и применение [Текст] // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т.19. № 1. С. 36–41.
 55. Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г. Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине: анализ и применение [Текст] // Технология машиностроения. 2017. № 5. С. 50–54.

References (transliterated)

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushiy kontrol: Spravochnik: V 7 t. pod obsh. red. V.V. Klyueva. Vol.3: Ultrazvukovoy kontrol // Moscow.: Izd-vo Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
2. Bobrov V.T., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Sostoyanie i tendencii razvitiya akusticheskikh (ultrazvukovykh) metodov, sredstv i tehnologiy nerazrushayushogo kontrolya i tehnichejskoj diagnostiki // Territoriya NDT. 2014. – No 2. – P. 24–27.
3. Sudakova K.V., Kazyukevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produkcii // V mire nerazrushayushogo kontrolya. 2004. – No 3. – P. 8–10.
4. Semerenko A.V. Primenenie EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevatelej kotelnyh ustanovok // Territoriya NDT. 2014. – No1. – P. 42–43.
5. Sajt kompanii Nordinkraft [elektornnyj resurs] // Rezhim dostupa: www.nordinkraft.de. – (Data obrasheniya: 23.08.2019).
6. Capenko V.K., Kuc Yu.V. Osnovi ultrazvukovogo nerujnivnogo kontrolyu: Pidruchnik. // Kiyiv: Izd-vo NTUU «KPI», 2010. – 448 p.
7. Aleshin N.P., Belyi V.E., Vopilkin A.H., Voshanov A.K., Ermolov I.N., Gurvich A.K. Metody akusticheskogo kontrolya metallov. Pod red. Aleshina N.P. // Moscow.: Izd-vo Mashinostroenie, 1989. – 456 p.
8. Kawashima K., McClung R. Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radials polarized transverse // Materials Evaluation, 1976. Vol. 34. No 4. – P. 81–90.
9. Sajt All-Pribors. Statistika AO "Votum", Moldova, Kishinev [elektronnyj resurs] // Rezhim dostupa: <https://all-pribors.ru/companies/ao-votum-moldova-g-kishinev-1625>. – (Data obrasheniya: 23.08.2019)
10. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Hashina S.V., Desyatnichenko A.V., Nozdracheva E.L. Povysenie vozmozhnostej beskontaktnoj defektoskopii poverhnosti katanyh feromagnitnyh izdelij // Kontrol. Diagnostika, 2013. No4. – P. 31–35.
11. Muraveva O.V., Muravev V.V., Strizhak V.A., Kokorina E.N., Lofferman M.A. Realnaya chuvstvitelnost vhodnogo akusticheskogo kontrolya prutkov-zagotovok pri proizvodstve pruzhin // V mire nerazrushayushogo kontrolya, 2013. No1. – P. 62–70.
12. Ermolov I.N. Dostizheniya v teoreticheskikh voprosah ultrazvukovoj defektoskopii, zadachi i perspektivy // Defektoskopiya, 2004. No 10. – P. 13–48.
13. Sazonov Yu.I. Elektromagnitno-akusticheskie efekty v kondensirovannykh sredah i fizicheskie metody ih ispolzovaniya // XXVII sessiya Rossijskogo akusticheskogo obshchestva, posv. pamyati uchenyh-akustikov FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr» A.V. Smolyakova i V.I. Popkova. S.-Peterburg. 16–18 aprelya 2014. – 17 p.
14. Muzhickij V.F., Komarov V.A. Dvoynoe EMAP pri elektrodinamicheskom mehanizme preobrazovaniya v normalnom polarizuyushem pole // Defektoskopiya. 2009. No2. – P.67–77.
15. Komarov V.A., Muzhickij V.F., Remezov V.B. K osnovam EMA tolshinometrii s pomoshyu nakladnyh preobrazovatelej. III. Obratnoe i dvoynoe EMAP v normalnom polarizuyushem pole // Defektoskopiya. 2007. No 1. – P. 64-79.
16. Muzhickij V.F., Remezov V.B., Komarov V.A. Pryamoe elektrodinamicheskoe EMAP v normalnom polarizuyushem pole. III. Zavisimost akusticheskogo polya ot makroskopicheskikh parametrov sredy preobrazovaniya // Defektoskopiya. 2008. No8. – P. 21–34.
17. Muzhickij V.F., Remezov V.B., Komarov V.A. K osnovam EMA tolshinometrii s pomoshyu nakladnyh preobrazovatelej. IV. Obratnoe i dvoynoe EMAP v tangencialnom polarizuyushem pole // Defektoskopiya. 2007. No2. – P. 35–52.
18. Remezov V.B. Issledovanie elektromagnitnyh polej, vzbuzhdaemyh izluchatelem tipa «vitok» // Defektoskopiya. 2013. No7. – P. 3–12.
19. Muraveva O.V., Muravev V.V., Myshkin A.V. Vliyanie konstruktivnyh osobennostej protivofaznykh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej na formirovanie diagramm napravlenosti. // Defektoskopiya. 2014. No 9. – P. 41–49.
20. Muraveva O.V., Myshkin A.V. Modelirovanie akusticheskikh polej sinfazykh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej //

- Defektoskopiya. 2013. No 12. – P. 69–76.
21. Myshkin A.V. Vliyanie konstruktivnykh parametrov mnogoelementnykh fazirovannykh preobrazovatelej na formirovanie akusticheskikh polej. Dis. k.t.n. Izhevsk, 2015. – 175 p.
 22. Muraveva O.V., Kokorina E.H., Sterhov V.D., Malyutin D.V. Modelirovanie sistem podmagnichivaniya elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej obemnykh voln dlya kontrolya prutkovogo prokata // Priborostroenie v XXI veke – 2011. Integraciya nauki, obrazovaniya i proizvodstva: Sb. materialov VII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Izhevsk. Izd-vo IzhGTU, 2012. – P. 198–202.
 23. Fokeeva E. N. Elektromagnitno-akusticheskij zerkalno-tenevoj metod kontrolya kachestva prutkov iz resorno-pruzhinnoj stali. Dis. k.t.n.. Izhevsk, 2013. – 147 p.
 24. Petrishev O.N., Suchkov G.M., Plesnecov S.Yu. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 1. Teoreticheskie osnovy rascheta i proektirovaniya elektroakusticheskikh preobrazovatelej elektromagnitnogo tipa: monografiya. – Harkiv: Vidavnistvo «Oberig», 2019 – 556 p.
 25. Plesnecov S.Yu., Petrishev O.N., Migushenko R.P., Suchkov G.M. Modelirovanie processa elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya pri vzbuzhdenii krutilykh voln // Tehnichna elektrodinamika. 2017. No 3. – P. 79–88.
 26. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2 // Tekhnichna Elektrodinamika. 2018. No 1. – P. 30–36.
 27. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3 // Tekhnichna Elektrodinamika, 2018. No 3. – P. 10–19.
 28. Plesnetsov S.Yu., Migushchenko R.P., Petryshev O.N., Suchkov G.M., Khrypunov G.S. Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals // Journal of nano- and electronic physics. 2017. Vol. 9. No 5. 05041 (7pp).
 29. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M., Khrypunova A.L. Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2018. 5(4), 04001, (9pp).
 30. Migushenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Bolyuh V.F., Plesnecov S.Yu., Kocherga A.I. Informacionno-izmeritelnye elektromechanicheskie preobrazovateli dlya ocenki kachestva poverhnosti ferromagnitnykh metalloizdelij ultrazvukovymi volnami Releya // Tehnichna elektrodinamika, 2017. No 2. – P. 70–76.
 31. Chabanov V. E., Zhukov V. A. Osobennosti ultrazvukovogo kontrolya s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej // V mire nerazrushayushogo kontrolya, 2013. No1. – P. 36–43.
 32. Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Qingxin Yang. Microscopic Mechanism and Experiment Research of Electromagnetically Induced Acoustic Emission // IEEE Transactions on Magnetics. November 2015. Vol. 51. No. 11, Code 9401804. – 4pgs.
 33. Shen Wang, Songling Huang, Yu Zhang, Wei Zhao. Multiphysics Modeling of a Lorentz Force-Based Meander Coil Electromagnetic Acoustic Transducer via Steady-State and Transient Analyses // IEEE Sensors Journal, 2016, Vol. 16, No 17. P. 6641 – 6651. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2587620.
 34. Yong Li, Yi-li Li, Zhen-mao Chen. A fast analytical model of Electromagnetic Acoustic Transducers for evaluation of flat non-magnetic conductors // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 237 – 241. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928271.
 35. Yuedong Xie, G Sergio Rodriguez, Wuliang Yin, Anthony Peyton, Zenghua Liu, Jianna Hao, Qian Zhao, Ben Wang. Simulation and experimental verification of a meander-line-coil electromagnetic acoustic transducers (EMATs). 2016. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Pages: 1 – 6, DOI:10.1109/I2MTC.2016.7520422.
 36. Fumio Kojima, Akinori Furusawa, Takafumi Ito. Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic transducer // 10th Asian Control Conference (ASCC). IEEE Conference Publications, 2015. P. 1-6. DOI:10.1109/ASCC.2015.7244773.
 37. Guo-fu Zhai, Bo Liu, Chao-ran Deng, Yong-qian Li, Lei Kang. An inspection device based on multiple Lamb wave electromagnetic acoustic transducers // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 14 – 18. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928225.
 38. Wilcox P.D., M. Lowe JS, Cawley P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, Vol. 52, No. 12. P. 2370 – 2383. DOI: 10.1109 / TUFFC.2005.1563281.
 39. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Bihan Y. Le. Electromagnetic Acoustic Transducer for cracks detection in conductive material. // 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE Conference Publications. P. 1 – 4. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416717.
 40. Huidong G., Borja L. Razrabotka odnokanalnykh elektromagnitnykh akusticheskikh preobrazovatelej i elektromagnitnykh akusticheskikh fazirovannykh reshetok dlya kontrolya austenitnykh shvov [elektronnyj resurs] // Ekolink oborudovanie. Rezhim dostupa: http://ekolink.ru/data/1/Austenitic_Weld_Article.pdf. – (Data obrasheniya: 23.08.2019).
 41. Eiji Matsumoto, Shinji Kitamura, Jun Abe. Optimal design of electromagnetic acoustic transducer // The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607846.
 42. Kousuke Kanda, Koudai Okazaki, Toshihiko Sugiura. Wire-rope Inspection Using Guided Waves Transmitted by Electromagnetic Acoustic Transducers // 日本AEM学会誌, 2015. Vol. 23. No.1.
 43. Yamasaki T., Kawabe D., Ohtani T., Hirao M. Flaw Detection in Copper Tubes Using Longitudinal Wave by Electromagnetic Acoustic Transducers // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers, 2004. No. 70 (690). – P. 238– 245.
 44. Costin Vasile, Comel Ioana. Arc fault detection & localization by electromagnetic-acoustic remote sensing // 2016 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). P. 1–2. DOI:10.1109/RADIO.2016.7772044.
 45. Fei Gao, Xiaohua Feng, Siyu Liu, Ruochong Zhang, Ran Ding, Rahul Kishor, Yuanjin Zheng. Nonlinear electromagnetic-acoustic sensing and imaging. // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE Conference Publications. P. 2017 – 2020. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848379.
 46. Liang Jin, Suzhen Liu, Qingxin Yang, Haiyan Chen, Chuang Zhang. Study of electromagnetic acoustic emission for non-destructive testing. 2008 World Automation Congress. – P. 1–4.
 47. Alers G. A. Electromagnetic induction of ultrasonic waves: EMAT, EMUS, EMAR [elektronnyj resurs] // 16th World Conference on NDT. 2004, Monreal, Canada. Rezhim dostupa: http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/691_alers.pdf. – (Data obrasheniya: 23.08.2019).
 48. McNamara J., Lanza di Scalea F. Improvements in Noncontact Ultrasonic Testing of Rails by the Discrete Wavelet Transform // Materials Evaluation, 2004. No. 62 (3). – P. 365–372.
 49. Salam Bussi EP. Mishel Kassabli. Ultrazvukovij peretvoryuvach dlya bezkontaktnogo kontrolyu virobiv z feromagnitnih materialiv // Materiali i Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi internet-konferenciji «Integraciya osviti, nauki ta biznesu v suchasnomu seredivishi: litni disputi». 2019. 1-2 serpnia. – P. 620–624.
 50. Alehin S.G. Tolshinometriya metallokonstrukcij na osnove elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya v impulsnom magnitnom pole: kand. dis. // M.: MNPO «Spektr», 2013. – 95 p.
 51. Suchkov G.M. Razvitie teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya metalloizdelij: dokt. dis. // Harkov, NTU «HPI», 2005. – 521 p.
 52. Suchkov G.M., Donchenko A.V., Desyatnichenko A.V., Kelin A.A., Nozdacheva E.L. Povyshenie chuvstvitelnosti EMA priborov // Defektoskopiya. 2008. No2. – P. 15–22.
 53. Suchkov G.M. Issledovanie osobennostej rasprostraneniya uprugih voln, vzbuzhdaemykh EMA sposobom // Kontrol. Diagnostika. 2001. No 12. – P. 36–39.
 54. Bobrov V. T., Shevaldykin V. G. Mnogokratnye ultrazvukovye ehosignaly v plastine: analiz i primenenie [Tekst] // V mire nerazrushayushogo kontrolya. 2016. – Vol.19. – No 1. – P. 36–41.
 55. Bobrov V. T., Shevaldykin V. G. Mnogokratnye ultrazvukovye ehosignaly v plastine: analiz i primenenie [Tekst] // Tehnologiya mashinostroeniya. 2017. No 5. – P. 50–54.

Поступила (received) 05.08.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Салам Буссі (Салам Бусси, Salam Bussey) – аспірантка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

Сучков Григорій Михайлович (Сучков Григорий Михайлович, Suchkov Hrigoriy Mihailovich) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Мигущенко Руслан Павлович (Мигущенко Руслан Павлович, Migushenko Ruslan Pavlovich) – доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Кропачек Ольга Юрїївна (Кропачек Ольга Юрьевна, Kropachek Olga Yuryevna) – доктор технічних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich) – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com